Schriftenreihe
des Instituts für
Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Nr: 66

M.Sc.
Felix Tigges
2020

Fahrdynamische Potentiale radindividueller Allradantriebe

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Fahrdynamische Potentiale radindividueller Allradantriebe

Bei der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte Dissertation

von:	Felix Tigges
geboren in (Geburtsort):	Wolfsburg

Vorsitz:	apl. Prof. Dr.-Ing. R. Henze
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay
	Prof. Dr.-Ing. L. Frerichs

2019

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 66

Felix Tigges

Fahrdynamische Potentiale radindividueller Allradantriebe

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7503-8
ISSN 1619-6325

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Ich danke allen, die an dieser unvergesslichen Zeit, die für mich so interessant und lehrreich war, mitwirkten.

Besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, Direktor des Instituts für Fahrzeugtechnik, der mir in der gemeinsamen Zeit am Institut stets große Freiheit in der Ausgestaltung meiner Arbeit in Forschung und Lehre einräumte und mir damit zu fachlicher und persönlicher Weiterentwicklung verhalf.

Prof. Dr.-Ing. Ludger Frerichs, Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für die Betreuung als Gutachter meiner Dissertation.

Weiterhin danke ich apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsverfahren sowie für das entgegengebrachte Vertrauen während der gemeinsamen Zeit am Institut.

Den Institutskollegen danke ich für die vielen fachlichen und überfachlichen Diskussionen, die zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen. Besonders möchte ich Waldemar Jarisa für die Betreuung meiner Studien- und Masterarbeit, die Korrekturlesung der vorliegenden Arbeit sowie besonders für die gemeinsame Zeit im Büro und auf Dienstreisen danken. Holger Znamiec danke ich für die gemeinsame Zeit am Institut, die Korrekturlesung und mittlerweile langjährige Freundschaft. Jan Sterthoff war mir stets ein guter Büro- und Arbeitskollege in gemeinsamen Projekten sowie ein guter Freund abseits des Berufslebens. Zudem möchte ich mich bei Bodo Schönemann für den angenehmen Einstieg in das Institutsleben und die Betreuung meiner Bachelorarbeit bedanken.

Des weiteren danke ich allen nicht namentlich genannten aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts für das angenehme Arbeitsklima und das tolle Kollegium, sowie allen Studenten, die mich bei meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut unterstützt haben.

Mein größter Dank gebührt jedoch meiner Familie, meinen Eltern danke ich für die lebenslange Unterstützung und somit die Grundsteinlegung für das Gelingen dieser Arbeit. Letztlich danke ich meiner Frau Jennifer für das aufgebrachte Verständnis, die motivierenden Worte und den nötigen Ausgleich während dieses Vorhabens.

Braunschweig, 4. Juli 2020

Felix Tigges

Fahrdynamische Potentiale radindividueller Allradantriebe

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit stellt eine Potentialabschätzung radindividueller Allradantriebe in Bezug auf eine verbesserte fahrdynamische Stabilität und Performance dar. Kern dieser Analyse bilden erweiterte Regelungs- und Eingriffslogiken der bekannten Regelsysteme Antiblockiersystem und elektronische Stabilitätskontrolle, sowie ein Torque Vectoring zur bedarfsgerechten Antriebsmomentenverteilung auf die vier Räder.

Elektrische Antriebsmaschinen werden ebenfalls generatorisch zur Bremsenergierückgewinnung eingesetzt. Sie weisen gegenüber hydraulischen Reibbremsen einen spontaneren Momentenaufbau auf und können somit durch eine präzisere Radschlupfregelung zur Reduzierung des Bremswegs beitragen. Diese Arbeit liefert einen Regelkreis zur Steigerung der rekuperierten Energie bei reduziertem Bremsweg im ABS-Regelfall, indem die elektrische Maschine als Hauptaktuator und die hydraulische Reibbremse als Hilfsaktuator aufgefasst wird.

Die Eingriffslogik der elektronischen Stabilitätskontrolle wird in der vorliegenden Arbeit um den gleichzeitigen Einsatz von Antriebs- und Bremsmomenten erweitert. So können gegenüber der konventionellen Stabilitätsregelung größere Giermomente erzeugt werden, während zeitgleich die Reibwertausnutzung der einzelnen Räder und der Einfluss auf die Fahrzeuglängsdynamik reduziert werden.

Zur Ausnutzung der Variabilität in der Antriebsmomentenverteilung eines radindividuellen Allradantriebs wird ein Torque Vectoring aufgebaut, das die Antriebsmomente sowohl longitudinal als auch lateral über die vier Räder verteilt. Die longitudinale Verteilung verfolgt das Ziel einer möglichst homogenen Kraftschlussausnutzung an Vorder- und Hinterachse, während die laterale Verteilung eine Gierratenregelung darstellt. Zusätzlich zur Einhaltung stabiler Fahrzustände selbst in äußerst kritischen Manövern liefert das Torque Vectoring die Möglichkeit der Anpassung des Sollfahrzeugverhaltens, sodass das Fahrzeug ausgehend von seinen Basiseigenschaften ein stabileres oder agileres Fahrverhalten aufweist. Die Potentialanalyse basiert auf dem am Institut für Fahrzeugtechnik entwickelten Gesamtfahrzeugmodell, das um den untersuchten Antriebsstrang erweitert wird.

In den abschließenden Simulationen wird die Tauglichkeit der elektrischen Maschinen zur Verbesserung heutiger Stabilitätsfunktionen nachgewiesen. Das Antiblockiersystem mit elektrischen Maschinen weist gegenüber einem bereits sehr guten hydraulischen Antiblockiersystem einen reduzierten Bremsweg auf. Die elektronische Stabilitätskontrolle mit veränderter Eingriffslogik zeigt ein verbessertes Folgeverhalten und minimiert die Längsverzögerung während notwendiger Eingriffe. Das Torque Vectoring beeinflusst das Fahrzeugverhalten im gesamten Querbeschleunigungsbereich positiv, sowohl in quasi-stationären als auch transienten Manövern und dies in rein querdynamischen sowie längs-querdynamisch kombinierten Fahrmanövern.

Vehicle dynamics potentials of wheel-individual all-wheel drive

Abstract

The present work represents a potential estimation of wheel-individual all-wheel drive regarding improved vehicle dynamics stability and performance. The core of this analysis are enhanced control and intervention logics of the well-known control systems anti-lock braking system and electronic stability control, as well as torque vectoring for the on-demand drive torque distribution to the four wheels. Electric propulsion machines are also used as generators for brake energy recovery. Compared to hydraulic friction brakes, they have a more spontaneous torque build-up and can thus contribute to reducing the braking distance through more precise wheel slip control. This work provides a control circuit to increase the recovered energy with reduced braking distance in the ABS control case by considering the electric machine as the main actuator and the hydraulic friction brake as a supporting actuator.

The intervention strategy of the electrical stability control is extended in the present work by simultaneous use of drive and braking torques. Thus, compared to the conventional stability control more yaw torque is generated, while at the same time the adhesion utilization of the individual wheels and the influence on the vehicle longitudinal dynamics are reduced.

To exploit the variability of drive torque distribution of a wheel-individual all-wheel drive, a torque vectoring is set up, which distributes the drive torques both longitudinally and laterally over the four wheels. The longitudinal distribution pursues the goal of homogeneous adhesion utilization on the front and rear axle, while the lateral distribution represents a yaw rate control. In addition to maintaining stable driving conditions, even in extremely critical maneuvers, torque vectoring provides the ability to adjust target vehicle behavior so that the vehicle shows a more stable or agile handling compared to its basic characteristics.

The potential analysis is based on an overall vehicle model developed at the Institute of Automotive Engineering, which is expanded to include the powertrain investigated.

The final simulations demonstrate the suitability of the electric machines to improve today's stability functions. The anti-lock braking system with electric machines presents a reduced braking distance compared to an already very good hydraulic anti-lock braking system. The electronic stability control with modified intervention logic shows an improved follow-up behavior and minimizes the longitudinal deceleration during necessary interventions. Torque vectoring has a positive influence on vehicle behavior in the entire lateral acceleration range, both in steady state and transient maneuvers, and in purely lateral-dynamic as well as in combined longitudinal-lateral dynamic driving maneuvers.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen **III**

1 Einleitung **1**
1.1 Zielsetzung der Arbeit 2
1.2 Aufbau der Arbeit 3

2 Grundlagen **5**
2.1 Fahrdynamische Grundlagen 5
2.1.1 Fahrzeugbewegung in der x-y-Ebene 5
2.1.2 Reifen 9
2.1.3 Dynamische Radlaständerungen 13
2.1.4 Lineares Einspurmodell 15
2.1.5 Momentengleichgewicht am rollenden Rad 19
2.2 Regelungstechnische Grundlagen 20
2.2.1 Modellfolgeregelung 22
2.2.2 PID-Regler 22

3 Stand der Technik **25**
3.1 Antiblockiersystem – ABS 25
3.1.1 Aufbau und Funktionsweise des ABS-Regelkreises 26
3.1.2 Antiblockiersystem in Elektrofahrzeugen 30
3.2 Elektronische Stabilitätskontrolle – ESC 33
3.2.1 Aufbau und Funktionsweise des ESC-Regelkreises 34
3.2.2 Elektronische Stabilitätskontrolle in Elektrofahrzeugen . . 37
3.3 Antriebsmomentenverteilung und Torque Vectoring 38

4 Fahrzeugmodell **43**
4.1 Fahrer 44
4.2 Fahrzustand 45
4.3 Aufbau 47

4.4 Antriebsstrang und Bremse 49
4.5 Fahrwerk und Reifen 50
4.6 Validität 52

5 Regelkreise 55
5.1 Brems- und ABS-Regelkreis 55
5.1.1 Gesamtregelkreis des Antiblockiersystems 56
5.1.2 Bremsschlupfregelung 57
5.1.3 Brake-Blending 58
5.2 Elektronische Stabilitätskontrolle 63
5.2.1 Gesamtregelkreis der elektronischen Stabilitätskontrolle . 64
5.2.2 Ermittlung des Fahrerwunschs 65
5.2.3 Gierratenregelung 66
5.2.4 Eingriffslogik 67
5.3 Torque Vectoring 69
5.3.1 Gesamtregelkreis des Torque Vectoring 70
5.3.2 Generierung des Sollverhalten 71
5.3.3 Longitudinale Momentenverteilung 77
5.3.4 Laterale Momentenverteilung 79

6 Potentialanalyse 83
6.1 Antiblockiersystem – ABS 83
6.2 Elektronische Stabilitätskontrolle 87
6.3 Torque Vectoring 89
6.3.1 Stationäre Kreisfahrt – ISO 4138 90
6.3.2 Lenkwinkelsprung – ISO 7401 93
6.3.3 Sine with Dwell – FMVSS No. 126 99
6.3.4 Beschleunigte Kreisfahrt 102
6.3.5 Bremsen im Kreis – ISO 7975 103
6.3.6 Handlingkurs 107
6.3.7 Redundante Querführung 109

7 Zusammenfassung und Ausblick 113